

論文 A S Rで劣化した橋脚の耐震性能に関する実験的研究

小野 聖久^{*1}・広瀬 剛^{*2}・本間 淳史^{*3}・三桶 達夫^{*4}

要旨：アルカリ骨材反応（ASR）による膨張により、鉄筋の曲げ加工部や圧接箇所の一部で鋼材が破断する事例が複数報告されている。しかし、ASRによる劣化をうけている多くのコンクリート構造物は鉄筋の破断まで至っておらず、この程度のASR劣化が耐震性能に及ぼす影響については明確になっていない。本研究では、ASRで劣化した柱試験体を用いて交番載荷試験を行い、耐震性能の検証を行った。その結果、ASRにより鉄筋ひずみにして850 μ 程度の変状が起きた構造物においても耐震性能の低下は見られないことを確認した。

キーワード：アルカリ骨材反応，橋脚，交番載荷試験，耐震性能

1. はじめに

近年、アルカリ骨材反応（以下、ASRという）で劣化したコンクリート構造物の一部に、鉄筋の曲げ加工部や圧接箇所が破断した事例が報告されており、それらの構造物については、耐荷力に関する検討や大規模な補強対策工法も実施されている¹⁾。一方、ASR抑制対策が実施される以前に建設されたコンクリート構造物に、地域が限定されているもののASRによるひび割れを生じたものも多く見受けられる。それらの構造物については現時点では比較的劣化の進行は小さく、前述したような大規模な補強を行うケースはないが、今後、ASRによる劣化の進行度合によっては耐荷力や耐震性能に影響する構造物が発生してくることが懸念される。

ASRが耐荷力に及ぼす影響に関する研究については幾つか実施され、鉄筋が破断していない場合では大きな耐荷力の低下はないとされているが、それらは梁などを単調載荷した実験が主で²⁾、柱の耐震性能の検討は少ない^{3),4)}。そこで、ASRで劣化した橋脚を模した柱試験体を用いて正負交番載荷実験を実施し、ASRの劣化による耐震性能への影響について確認を行った。

2. 実験の概要

2.1 ASR劣化した柱試験体

ASR劣化した柱試験体(Case1)の一般図を図-1示す。鉄筋はSD345材を使用し、主筋はD13およびD10、帯鉄筋はD6とし、全断面に対する主鉄筋比は2.38%とした。なお、この柱試験体は、1980年以前の基準を基に設計された独立2本柱形式の中の代表的な寸法のものとなっている。また、図-1の柱試験体を、橋脚の耐震補強の一般的な方法であるRC巻立て工法を行った補強試験体(Case2)を、図-2に示す。ここで、コンクリートの巻立て厚さや鉄筋量は、実際の巻立ての仕様（巻立て厚さ：250mm、主鉄筋：D32-ctc150、帯鉄筋D22-ctc100）をスケールダウンした。

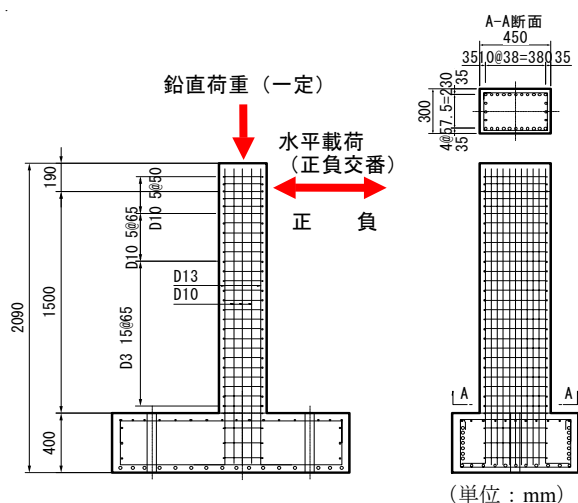
使用したコンクリートの配合は表-1に示すように、フーチング部と補強部には一般の骨材（細骨材：千葉県君津産山砂および神奈川県津久見産砕砂、粗骨材：愛知県豊橋産）を使用し、柱部分には反応性骨材（細骨材：信濃川水系川砂、粗骨材：信濃川水系川砂利）を使用している。柱部にはASRを促進させるために水酸化ナトリウムを2.5%（Na₂O換算）添加しており、

*1 (株) 高速道路総合技術研究所 道路研究部橋梁研究室 工修 (正会員)

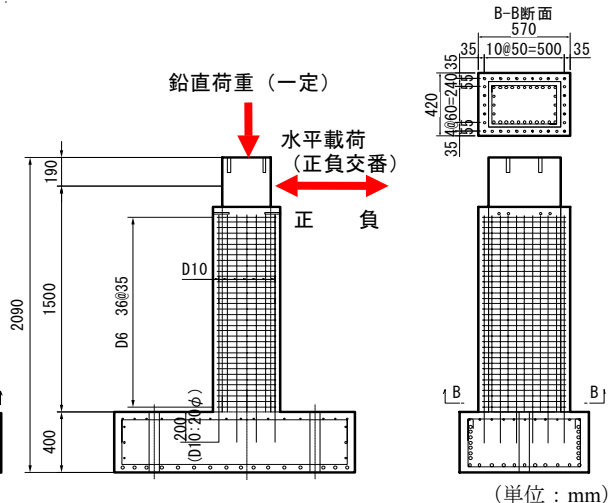
*2 東日本高速道路(株) 関東支社建設事業部外環建設チーム 工修 (正会員)

*3 (株) 高速道路総合技術研究所 道路研究部橋梁研究室室長 工博 (正会員)

*4 大成建設(株) 技術センター土木技術研究所土木構工法研究室 工修 (正会員)



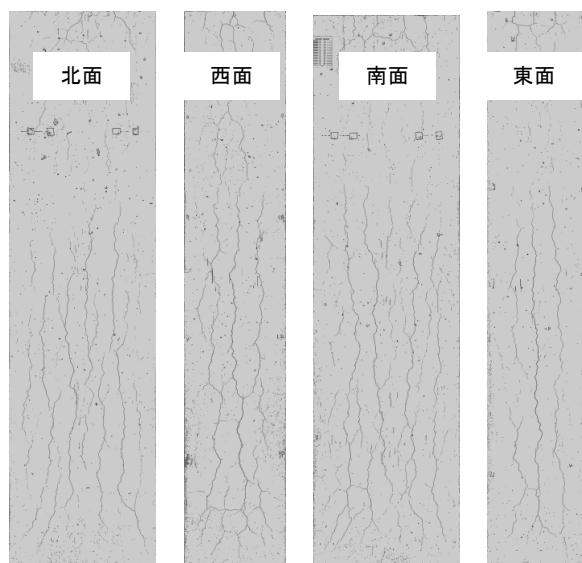
図－１ ASR 試験体 (Case1)



図－２ ASR 補強試験体 (Case2)

表－１ 使用したコンクリートの配合

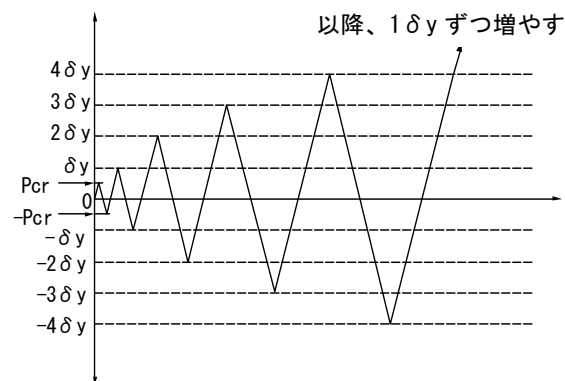
	目標強度 (N/mm ²)	Gmax (mm)	スランプ [※] (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				備考
							W	C	S	G	
柱	24	10	21±1.5	7.0±1.5	61.5	51.9	190	309	877	927	反応性骨材
フーチング [※]	24	10	21±1.5	7.0±1.5	71.2	57.0	197	277	968	833	
補強部	24(σ 21)	10	21±1.5	7.0±1.5	54.1	51.4	166	307	905	846	



図－３ 荷重前のひび割れ（柱表面）

柱試験体製作後、16 週間の蒸気養生（温度 40℃ 以上、湿度 90%以上）と屋外暴露を行って ASR 劣化を促進させ、約 1 年半後に Case2 は補強を行い、Case1, Case2 ともに荷重実験を行った。

荷重前の柱試験体の劣化状況について画像解析⁵⁾により得られた図を図－３に示す。ASR を促進させた結果、コンクリート表面には鉛直方向にひび割れが卓越しており、ひび割れ幅は 0.35～0.7mm 程度であった。また、3.3 でも示



図－４ 荷重ステップ

すように柱の主鉄筋には 850μ 程度の伸びが生じ、帯鉄筋は降伏ひずみに近い伸びが生じていた。柱基部の鉄筋ひずみは、主鉄筋、帯鉄筋ともに小さい傾向にあったが、これはフーチングの拘束によるものと考えられる。

また、主鉄筋の伸びは、以前に ASR 劣化した実構造物について、鉄筋切断法により鉄筋ひずみを測定した結果⁶⁾の 500～1500μ と同等程度であり、本試験体も実際の ASR 劣化に対応する状態にあると言える。

2.2 荷重方法

柱の正負交番荷重実験の荷重方法は、柱に上

表－２ 載荷実験時の計測項目

項目	計測箇所
水平荷重	水平載荷位置
水平変位	水平載荷位置
鉄筋ひずみ	主鉄筋 24 箇所，帯鉄筋 2 箇所
コンクリートひずみ	8 箇所
ひび割れ状況	各載荷ステップの正負のピークで観察



写真－１ 載荷状況 (Case1)

部工の死荷重に相当する軸力（Case1 での軸圧縮応力で 0.59N/mm^2 ）を加えた後，図－１に示すように柱上部に水平方向に載荷した。水平方向の載荷は，Case1 についてひび割れ発生まで載荷 (P_{cr}) 後に一度除荷し，その後 2.3 に示すひずみゲージにより確認した主鉄筋が降伏した時の水平載荷位置での変位を δy とし， δy の整数倍ずつ増加させて正負交番載荷した。また，Case2 についても Case1 で決定した δy を使用し，Case1 と同様に載荷した。

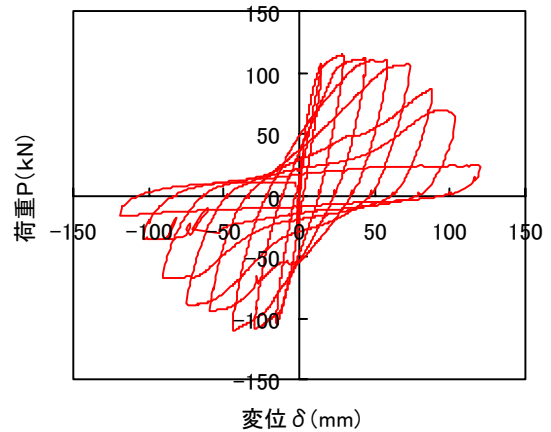
載荷パターンを図－４に示す。また，載荷状況を写真－１に示す。

2.3 計測方法

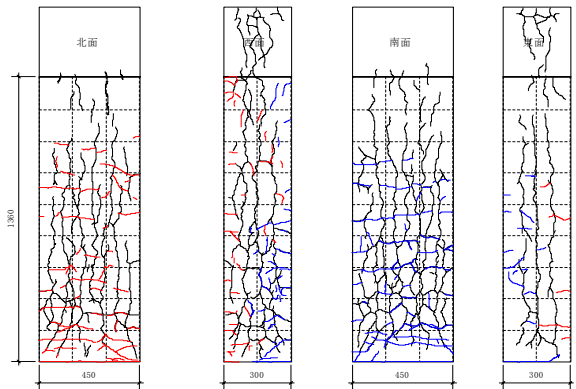
計測項目を表－２に示す。鉄筋のひずみの測定は，試験体製作時に事前に鉄筋にひずみゲージを貼付け，促進養生中もひずみ測定したものを載荷実験時にも使用した。鉄筋ひずみの計測位置は，載荷実験時に応力が集中すると想定される柱の基部付近の主鉄筋と帯鉄筋としたが，帯鉄筋については，ASR 劣化を促進させている間に，ほとんどのひずみゲージが計測不能となった。

3. ASR 劣化した柱試験体 (Case1) の実験結果

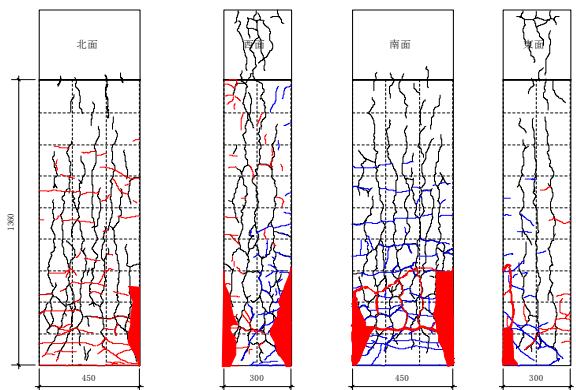
3.1 実験結果の概要



図－５ 荷重－変位関係 (Case1)



(1) $\pm 3\delta y$ 終了時



(2) $\pm 6\delta y$ 終了時

— ASR によるひび割れ — 正側載荷時のひび割れ
— 負側載荷時のひび割れ ■ 剥落部分

図－６ 載荷時のひび割れ図 (Case1)

交番載荷試験の結果として，荷重－変位関係を図－５に，載荷時のひび割れの進展状況として， $3\delta y$ および $6\delta y$ 終了時のひび割れ図を図－６に示す。載荷前から ASR により生じていたひび割れ以外のひび割れについては，正側

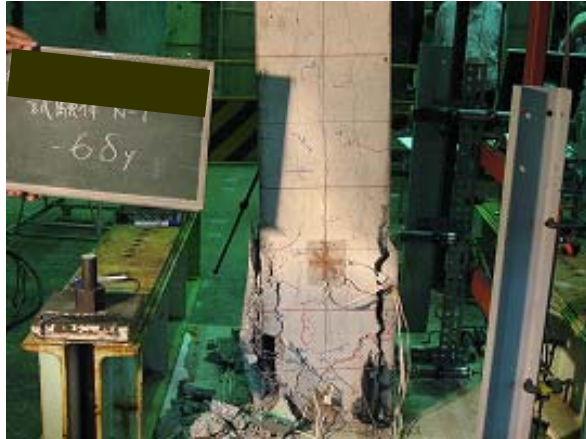


写真-2 試験体の破壊状況 (6 δy 終了時)

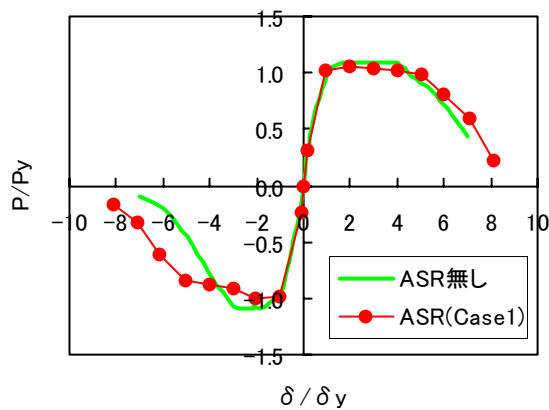


図-7 ASRの有無による耐荷力の比較
(Case1)

+35.0kN, 負側-25.0kN で生じた。また, 主鉄筋の降伏は, 荷重は正負の平均で 107kN, 変位(δy)は 14.65mm であった。正負ともに約 110kN で最大荷重を迎え, 正側+6 δy , 負側-4 δy でかぶりコンクリートが剥落し荷重の低下がみられ,

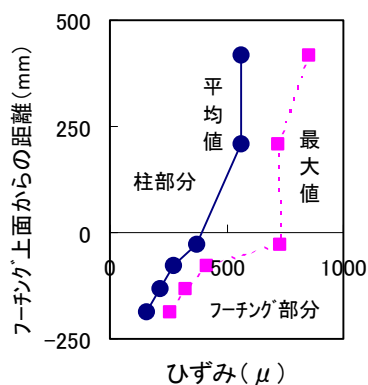


図-8 実験開始時の主鉄筋のひずみ (平均)

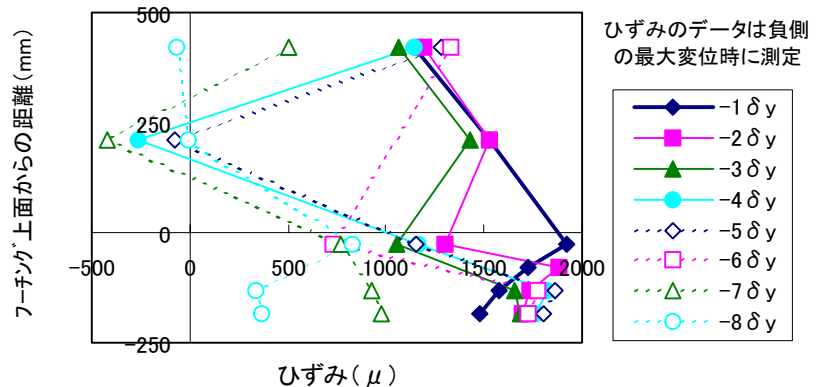
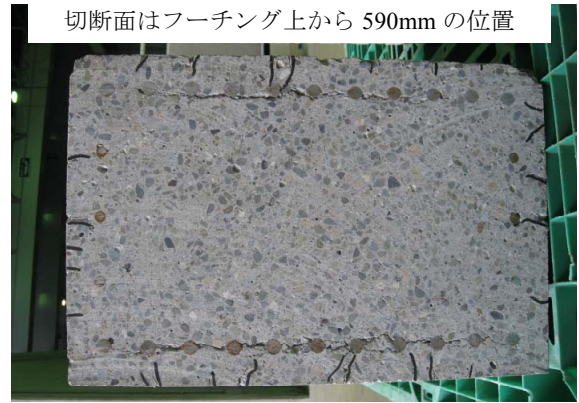


図-9 各サイクルでの主鉄筋のひずみ
(実験開始時のひずみを0としている)



ひび割れはマジックによりトレースしている。また, 鉄筋に沿ったひび割れは載荷実験によるひび割れである。

写真-3 切断した断面のひび割れ (Case1)

主鉄筋の座屈も目視により確認された (写真-2)。

3.2 ASR 劣化していない試験体との比較

ASR で劣化していない柱試験体との比較として, 同一形状で, 鉄筋量もほぼ同等の試験体で正負交番載荷実験を行っている既往の実験⁷⁾と比較を行った。材料物性などの差異により最大荷重等が多少異なるため, 各サイクルでの最大荷重(P)を降伏時の荷重(Py)で除して耐震性能を比較したものを図-7に示す。

ASR 劣化していない試験体では, 降伏変位 13.9mm, 最大荷重 111kN であり, -4 δy 載荷途中で主筋が座屈し, かぶりコンクリートの剥落がみられている。図-7および破壊状況からみても, ASR の有無により, 柱試験体の耐震性能の差異はみとめられず, 今回の ASR による劣化

程度では、耐震性能の低下はみられないといえる。

3.3 鉄筋のひずみ

Case1 について、ASR 劣化による実験開始時の主鉄筋のひずみ（南北の平均と最大値）を図－8に、実験開始時を 0μ とした場合の、各サイクルの負側最大変位時の引張側鉄筋（北側）の主鉄筋のひずみを図－9に示す。

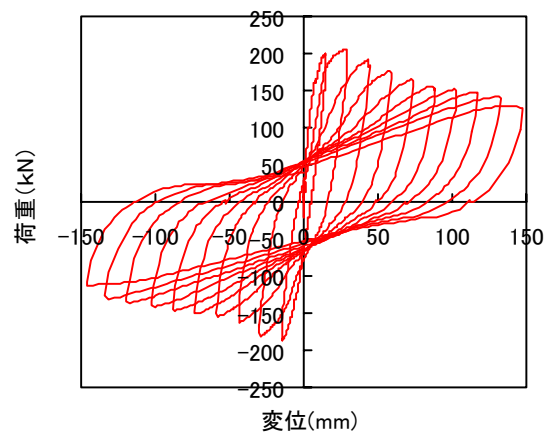
ASR の膨張により、柱部分（フーチングより高さ 420mm の位置）では平均で 564μ （最大 849μ ）の引張が生じているが、柱の基部からフーチング内部にいくに従い、ひずみは小さくなっている。载荷による降伏は、ASR によるひずみが小さい柱の基部で最初に降伏し始め、実験開始時のひずみを 0μ とすると約 1900μ であり、材料試験により確認した鉄筋の降伏ひずみの約 2100μ を大きく低下するものではなかった。この結果からも、ASR 劣化によるひずみの増加量が、ただちに耐荷力の低下にはつながらないと考えられる。

また、正負交番载荷の $2\delta y$ 以降、ひずみの最大箇所は柱の基部からフーチング内部へ移行しているが、これは、柱基部およびフーチング上部のひび割れの進展によるためと思われる。ASR により鉄筋にひずみが生じていたにもかかわらず、正負交番载荷による耐荷力の低下が見られなかった理由とし、図－8に示すように、フーチング内部は ASR による鉄筋ひずみが小さかったことが影響していると思われる。

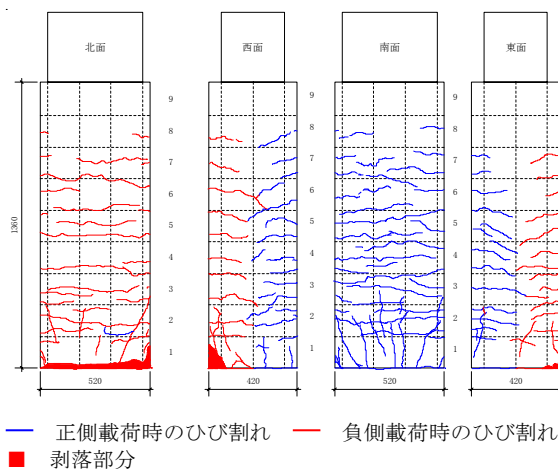
さらに 7,8 サイクル目では主筋の引張ひずみが全体的に低下しているが、これは負側変位時の圧縮側（南面）のかぶりコンクリートが大きくはく離し、南側鉄筋が座屈したためと考えられる。

3.4 内部の劣化状況

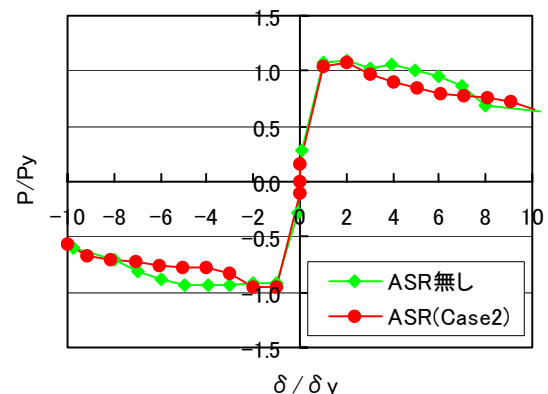
Case1 について、载荷実験が終了した試験体を切断して内部の ASR 劣化状況を確認した。切断した断面のひび割れを写真－3に示す。ひび割れ状況からも確認できるように、表面にひび割れが生じている場合でも、内部のコンクリー



図－10 荷重－変位関係 (Case2)



図－11 载荷時のひび割れ図 (Case2 · $10\delta y$)



図－12 ASR の有無による耐荷力の比較 (Case2)

トにはひび割れは見られず、結果として ASR 劣化していない試験体と差異はみられなかったものと考えられる。

4. 耐震補強試験体の実験結果

4.1 実験結果の概要

補強試験体について、繰返し変位を Case1 の

繰返し変位 δy (14.65mm) の整数倍と合せて正負交番載荷試験をおこなった。結果として、荷重－変位関係を図－10 に、 $\pm 10 \delta y$ 載荷後のひび割れ状況を図－11 に示す。補強部の主鉄筋は、正側で 130kN、負側で 110kN 程度で降伏し、既設部の主鉄筋は正側で 196.4kN (+12.8mm)、負側で 179.5kN (－12.4mm) で降伏した。

1 δy 載荷時に柱全体に曲げひび割れが発生したが、その後のひび割れの進展はフーチングとの付根のひび割れ（フーチングからの補強部の拔出し）が支配的であり、顕著なコンクリートの剥離や、主鉄筋の座屈は確認されなかった。

本ケースでは、降伏荷重以降に荷重の上昇がほとんどみられず、2 δy 以降荷重は低下するが、若干荷重が低下するが急激な耐荷力の低下はみられなかった。

4.2 ASR 劣化していない試験体との比較

既設部が ASR 劣化していない柱試験体を図－2 と同様に補強した試験体（劣化無補強試験体）と、最大荷重を比較した。各サイクルでの最大荷重 (P) を降伏時の荷重 (P_y) で除して耐震性能を比較したものを図－12 に示す。

劣化無補強試験体の繰返し変位 (δy) は 15mm であり Case2 とほぼ同等の変位で実験を行っており、各サイクルでの荷重の低下も、3 δy 以降に ASR 劣化の Case2 が多少低下しているが、試験終了時の 10 δy では同等の耐荷力であった。また、破壊状況からみても、既設部の ASR の有無による補強試験体の耐震性能の差異はみとめられなかった。

5. まとめ

本研究では ASR で劣化した橋脚を模して、実際に ASR 劣化させた柱試験体を用いて正負交番載実験をおこなった。実験結果から、以下の知見が得られた。

(1) 主鉄筋に最大 850 μ 程度のひずみが生じ、ひび割れも多数みられる ASR 劣化が生じた橋脚についても、耐震性能の低下はみられなかった。

(2) 橋脚の耐震性能が ASR 劣化によらない理由の一つとして、正負交番載荷により、ひずみの最大部分は ASR の劣化の影響が小さいフーチングの内部方向に移動していく。

(3) ひび割れ状況から ASR 劣化がはげしいと思われても、実際に ASR が生じている部分はかぶりコンクリート内だけであり、橋脚のコア部分にはひび割れが生じていない。

(4) ASR 劣化した既設部を RC 巻立てによる耐震補強を行った場合も、耐震補強効果は ASR による劣化がないものと同等であると判断される。

参考文献

- 1) 鳥居和之，池野修，久保善司，川村満紀：ASR 膨張によるコンクリート構造物の鉄筋破断の検証，コンクリート工学論文集，Vol.23，No.2，pp.595～600，2001
- 2) たとえば，小柳洽，六郷恵哲，内田裕市，長瀬道雄：著しい AAR 損傷を生じた RC はりの挙動，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15，No.1，pp.947～952，1993
- 3) 小林茂敏，森濱和正：アルカリ骨材反応を生じた部材や構造物の耐荷重性能－柱部材－，コンクリート工学，Vol.24，No.11，1986.11
- 4) 岩波光保，横田弘，奥山和俊，鳥居和之：ASR 損傷を受けたコンクリート柱の力学的挙動と補強方法に関する実験的研究，土木学会論文集，No.704/V-55，pp.129-142，2002.5
- 5) 武田均，堀口賢一，小山哲，丸屋剛：ウェーブレット変換を用いたコンクリートのひび割れ画像解析手法の開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1895-1900，2006
- 6) 長田光司，小野聖久，丸屋剛，池田尚治：アルカリ骨材反応で変状を起こしたコンクリート部材の耐震性能－現地調査と載荷実験による評価－，コンクリート工学，Vol.44，No.3，pp.34～42，2006.3
- 7) 長田光司，大野晋也，山口隆裕，池田尚治：炭素繊維シートで補強した鉄筋コンクリート橋脚の耐震性能，コンクリート工学論文集，第 8 巻第 1 号，pp.189～203，1997.1